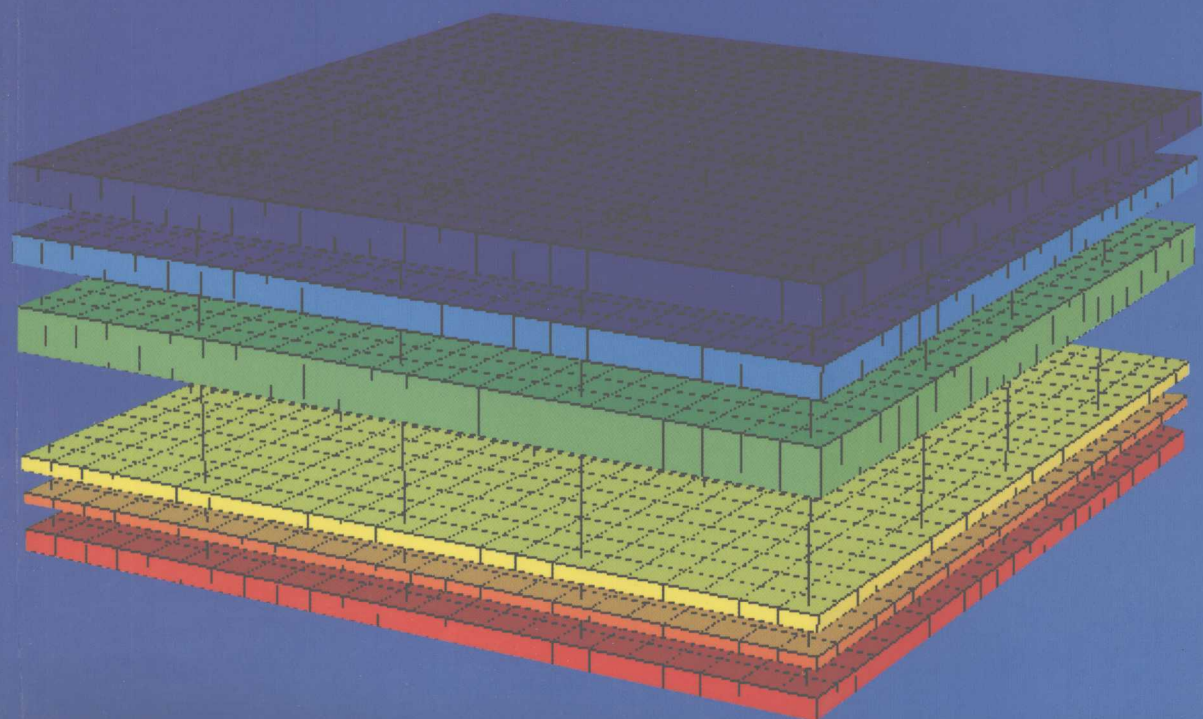


薄互层 低渗透油藏 开发技术

■ 李道轩 编著

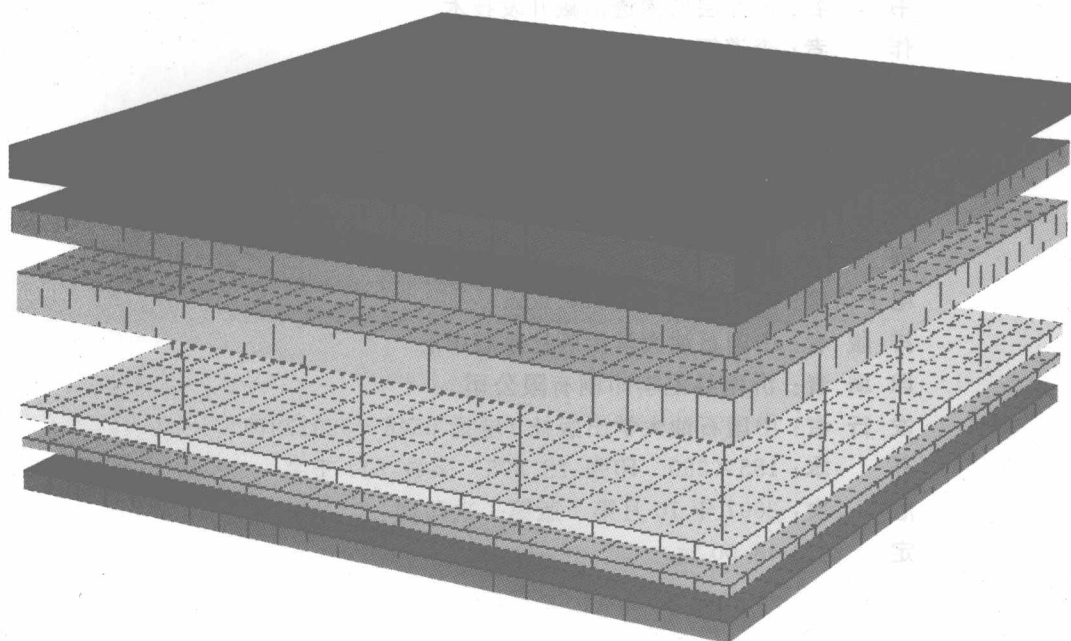


中国石油大学出版社

薄互层

低渗透油藏 开发技术

■ 李道轩 编著



中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

薄互层低渗透油藏开发技术/李道轩编著. —东营:中国石油大学出版社, 2007. 8

ISBN 978-7-5636-2430-0

I. 薄… II. 李… III. 低渗透油层-油田开发-研究
IV. TE348

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 114497 号

书 名: 薄互层低渗透油藏开发技术
作 者: 李道轩

责任编辑: 邵 云 (0546-8391282)

出 版 者: 中国石油大学出版社 (山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: sanbianshao@126.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 沂南县汇丰印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社 (电话 0546-8391797)

开 本: 185×260 印张: 23.875 字数: 611 千字

版 次: 2007 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 48.00 元

我国进入 20 世纪 90 年代以来,低渗透油田的储量增长很快,在总探明储量中所占的比例愈来愈大。

据初步统计,到 1994 年底,在探明未动用石油地质储量中,渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透层储量占 58%。而近几年,在当年探明的石油地质储量中,低渗透层储量所占的比例高达 60% 以上。可见低渗透层将是今后相当一个时期增储上产的主要资源基础。

众所周知,低渗透油田地质条件极其复杂,开采难度很大,客观需要技术投资较多与经济效益之间的矛盾十分突出,特别是薄互层低渗透油藏的开发更是如此。许多探明的薄互层低渗透储量都处于难动用的“边际油田”之中。

根据石油工业发展的需要,早在 20 世纪 80 年代中国石油天然气总公司就组织开展了低渗透油田开发配套工艺技术的综合研究攻关工作。1990 年 12 月召开的“全国油气田开发技术座谈会”提出,开发战线要打好对低渗透油田进行整体改造、提高开采速度、改善开发效果的阵地仗,要求把采油速度提高到 1.5% 以上。

近些年来,为了深入认识低渗透油田的地质特点和渗流机理,提高开采速度和采收率,改善开发效果和经济效益,各油田及有关院校应用多种先进设备,进行了大量室内分析研究和现场技术试验工作,取得了显著成绩。

1993 年 11 月,在西安召开的“全国低渗透油田开发技术座谈会”上,与会者介绍了各单位丰硕的研究成果和宝贵的实践经验。会议指出:低渗透油田储量的动用和开发已成为我国石油工业稳定发展的重要潜力之一,希望全国陆上各油气田一定要重视这些储量的动用并提高开发水平。要提高认识,加深对开采机理的分析研究,加强工艺技术攻关试验,建立以经济效益为中心的新观念。

目前,由于研究认识水平的提高和工艺技术的改进,我国已比较成功地开发了一批各种类型的低和特低渗透薄互层油田,如胜利纯梁油田,但与中高渗透油田相比仍有较大的差距。我国低渗透油田平均采收率只有 21.4%,比中高渗透油田(34%)低 12.6%。目前有 50 多个油田(区块)年开采速度小于 0.5%,这些低速低效油田(区块)的地质储量约 $3.2 \times 10^8 \text{ t}$,其平均采油速度仅为 0.27%,预测最终采收率只有 15.5%。尤其是有些储层裂缝特别发育、薄互层低渗透油田,开发难度很大,开发效果差。因而对低渗透油田,特别是对薄互层低渗透油田的开发问题还要继续加深分析研究和开展技术攻关试验。

本书是根据我们近十几年来在薄互层低渗透油藏开发方面的科研成果和大量生产实践资料,以及作者在新技术讲座、各大油田新技术培训班教材的基础上进行总结提高和充实完善而编著的。

本书采用油藏地质与工程技术,理论研究与生产实践相结合的方式,以胜利纯梁油田为例,对我国在薄互层低渗透油田开发方面所取得的认识及经验进行初步的总结,并试图从感性认识上升到理性认识,揭示各种因素的客观真实面目和主要特征,阐明诸多因素的内在联系和运动规律,探索科学处理各种矛盾的政策界限和技术途径,从而达到改善薄互层低渗透油田开发效果和提高经济效益的双重目的。

本书由胜利油田纯梁采油厂李道轩编著,由胜利油田纯梁采油厂工艺研究所杨广雷、胜利油田纯梁采油厂冯延状、胜利油田纯梁采油厂地质研究所李春琴进行了审定,最后由中国石油大学(华东)蒋官澄教授进行了终审。在本书的编写过程中得到胜利油田纯梁采油厂、大港油田采油工艺研究院、中国石油大学出版社等单位的大力支持,在此表示衷心的感谢。

科学技术是不断发展的,目前我们对薄互层低渗透油田开发的有些问题认识得还不十分清楚,需要在今后的研究和生产实践中进一步加深、提高和完善。同时,由于本书涉及的领域较广,加之作者水平有限,如有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2007年3月16日

第一章 薄互层低渗透油藏的地质特征	1
第一节 薄互层低渗透油藏的含义及分类	1
第二节 薄互层低渗透油藏的形成条件	7
第三节 薄互层低渗透储层特征	18
第四节 薄互层低渗透储层的非均质性	62
第五节 薄互层低渗透储层的敏感性	73
第六节 薄互层低渗透油藏的地应力及裂缝发育特征	79
第七节 薄互层低渗透油藏的驱动能量	87
第二章 薄互层低渗透油藏渗流理论基础	95
第一节 薄互层低渗透砂岩油藏表面物理性质	95
第二节 薄互层低渗透砂岩油藏非达西渗流理论	97
第三节 薄互层低渗透油藏启动压力研究	100
第四节 薄互层低渗透油藏油气水相渗流规律	114
第三章 裂缝性低渗透砂岩油藏中的渗吸机理及应用	121
第一节 薄互层特低渗透油藏地应力及裂缝网络预测	121
第二节 自发渗吸实验	133
第三节 自发渗吸数学模型	135
第四节 驱替条件下的渗吸实验	137
第五节 注水吞吐井的产量递减预测模型及应用	138
第四章 薄互层低渗透油藏开采特征	142
第一节 薄互层低渗透油藏产能递减规律	142
第二节 薄互层低渗透油藏的吸水特征	151
第三节 薄互层低渗透油藏注采关系	153
第四节 裂缝对薄互层低渗透油藏开发的作用	159
第五章 薄互层低渗透油藏的开发模式	164
第一节 薄互层低渗透油田的开发方式	164
第二节 弹性开发方式井网	174
第三节 人工补充能量开发方式井网	180
第四节 裂缝砂岩油藏井网优化	186
第五节 特殊结构井开发薄互层低渗透油藏	197
第六章 薄互层低渗透油层保护技术	207
第一节 薄互层低渗透油层损害的特点及类型	207
第二节 薄互层低渗透油层损害程度诊断技术	211

第三节	薄互层低渗透油层损害预防技术	237
第四节	薄互层低渗透油层解除损害优化决策技术	243
第七章	薄互层低渗透油田酸化工艺技术	264
第一节	薄互层低渗透油田酸化技术难点及技术对策分析	264
第二节	薄互层低渗透油田各酸化工艺技术	266
第三节	酸化工艺模拟实验	287
第四节	施工工艺优化研究	290
第五节	酸后效果评估	291
第八章	薄互层低渗透油藏压裂工艺技术	293
第一节	整体优化压裂方案设计	293
第二节	薄互层特低渗油藏大型压裂技术优化	302
第三节	压裂工艺技术	317
第四节	重复压裂	319
第五节	压裂方案的实施与压后评估	322
第九章	薄互层低渗透油藏开采工艺配套技术	324
第一节	机械采油技术	324
第二节	低渗透油田注水配套技术	331
第三节	薄互层套损、套破井防治技术	345
第十章	提高薄互层低渗透油藏采收率技术展望	355
第一节	薄互层低渗透油藏 CO_2 气驱开发应用探索	355
第二节	活性水驱替提高薄互层低渗透油藏采收率技术	362
参考文献		373

第一章 薄互层低渗透油藏的地质特征

第一节 薄互层低渗透油藏的含义及分类

一、分类评价的基本原则和参数

低渗透储集层分类评价的目的在于综合认识油层内部结构特征,为合理开发和提高最终采收率提供科学依据。

低渗透储集岩分类,还是以渗透率为基本标准,分为低渗透层、特低渗透层、超低渗透层、致密层等几种类型。在综合评价中,主要选择以下几方面的参数:

(1) 油层的微观结构参数,以反映流动半径,描述孔隙几何结构、退汞效率、孔喉比以及与采收率有关的参数为主要选择对象,以简化分类中的参数。

(2) 驱动压差和排驱压力,是量度储集层有效流动特征的最低压力,特别是和采收率有关的驱动压力。不同结构的油层虽有相同的采收率,但驱动压力不同。

(3) 储集层的比表面积,它是油层孔隙度和渗透率的函数,能全面反映储集层的性质。比表面小,储集性好;比表面大,储集性差。

(4) 相对分选系数和变异系数,是同质异名参数。它和标准差(σ)、分选系数(S_p),都是表示孔喉分选的。

二、低渗透储集层的综合分类评价

按前述原则和选择的参数,把全国 27 个低渗透油层的储集层分为六大类(表 1-1)。各类低渗透储集层,主要有以下特征。

中低渗透层:严格讲,此类油层不属于低渗透层范围,但为了对比起见,在此加以简要描述。

属于这类油层的有彩南油田三工河($K=60.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);玉门老君庙 M_1 油层($K=78.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);马岭油田延 $10^4 \sim 6$ ($K=60.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);文留油田沙三中盐间层,文 13 井区的 5、6 油层组($K=59.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),油层性质弱亲水—亲水,平均驱油效率为 55.56%。

这类油层和中高渗透油层相比,各项微观特征参数差异很大,中高渗透层和中低渗透层的分界线很明显,不论这个界限是否合理,其宏观特征和微观特征均是清楚的(表 1-1)。况且我们又引入了驱动压力、比表面积,使分界参数及特征明显和可靠,也更符合油层的流动特征。

I 类:一般低渗透层

属于此类油层的有:丘陵油田陵 2+3 井区($K=20.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);老君庙 M_2 ($K=14.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);枣园油田孔二段($K=40.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);马西深层板 II+III 油层组($K=13.58 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);文留油田沙二中盐间层($K=19.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);牛庄油田沙三下($K=29.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);朝阳沟油田扶余油层($K=12.67 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);新立油田葡萄花油层($K=25.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。

μm^2)。油层性质亲水,平均驱油效率为 55.43%,属低渗透油层中驱油效率最高的油层。

(1) 主流半径较小,孔隙几何因子为 0.82,孔喉配位低,属中孔、中细喉组合的油层。

(2) 驱动压力低,难度指数为 25.975;流动能力较差,开采较为容易。

(3) 退汞效率中(35%~41%),均质系数很差,驱油效率较高。

(4) 中低渗和一般低渗层,是以 $K=50\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 分界的。表 1-1 中的分界参数明显而清晰,据阎庆来(1993)的实验证明,当油层的渗透率低于 $40\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 时,无论无水采收率还是最终采收率,都是随渗透率的降低而降低,引起不同变化的渗透率约为 $(20\sim 40)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。这就为我们划出了一个一般低渗油层的范围值。这个值和我们确定的外界是接近的。油田更多的实验资料证明,只有渗透率低于 $10\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 时,水驱油效率才随渗透率的降低而降低,这里更不能忽略驱动力。

II 类:特低渗透层

属于此类油层的有:克拉玛依下乌尔禾组($K=1.73\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);彩南油田西山窑组($K=2.815\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);火烧山平地泉组平三段($K=9.28\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);丘陵油田西山窑组($K=4.87\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);鄯善油田三间房组($K=5.32\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$),西山窑组($K=1.73\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);老君庙 M_3 油层($K=6.3\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);枣园油田孔二段 IV 油层组($K=7.0\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);马西深层板 II 油层组($K=6.0\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);牛庄油田沙三中($K=7.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);渤南油田沙三 5 至沙三 9 油层($K=4.4\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);榆树林油田扶余油层和杨大成子油层(K 分别为 $3.40\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 和 $2.71\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);新民油田扶余油层($K=8.5\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$);安塞油田长 6¹ 油层($K=2.46\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)。油层性质中-弱亲水,水驱油效率为 50.90%。

(1) 平均主流半径小($1.5309\mu\text{m}$),孔隙几何较前者为差,相对分选系数好,孔喉配位低(3~2),属于中孔微喉、细喉组合的油层。

(2) 驱动压力大(3~10 MPa),难度指数大,流动能力差,比表面大,储渗参数低(20.59),不易开采。

(3) 微孔占 32.77%,退汞效率低,孔喉屏蔽作用强,孔隙滞留多,水驱效率中等。

一般低渗透层和特低渗层是以 $K=10\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 分界的。这个界限和国内各家的分界一致;表中列出的各项特征参数的分界性很强。特别是驱动压力显著增高,比表面能增大。可能代表的流动特征不同,因此这个界限的置信度是高的。

III 类:超低渗透层

属此类的油层有火烧山平地泉平二段;鄯善油田 J_2x 部分油层。油层属亲水,水驱油效率为 39.53%。

(1) 平均主流半径小于 $1.5\mu\text{m}$,孔隙几何差,相对分选系数好,孔喉配位在 2 左右,属小孔细微喉组合。

(2) 驱动压力大(10.0~16.0 MPa),流动性差,开采难度大,比表面积大,吸附滞留多,水驱油效率低。

IV 类:致密层(非有效厚度层)

属此类的层有高尚堡高参一井沙三 5 层段;克拉玛依下乌尔禾组 8006 井扇端, Jw_4 井扇缘层;平地泉油层平二段中的细砂岩、粉砂岩层;表面性质属亲水,水驱油效率低,为 36.52%。

关于超低渗透油层和致密层,是以 $K=0.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 作为分界指标的。这个分界的特征参数均较其他分界参数更为突出,差异更为明显。排驱压力、 G 值均大于 5。驱动压力大于 16 MPa。这个界限是油层有效厚度的下限(但如果储气的话,仍然是比较好的气层),在国际

表 1-1 全国低渗透油层综合分类评价表

类型	名称	标准范围 K/($\times 10^{-3}$ μm^2)	特征参数数														驱动压力/ MPa	比表 面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	
			排驱 压力 /MPa	中值 半径 $r_{30}/\mu\text{m}$	主流喉 道半径 $r_z/\mu\text{m}$	均质 系数 a	孔隙 几何 C	结构难 度指数 $D/\times 10^{-3}$	储渗 参数 $\phi \ln K$	相对分 选系数 CCR	退采效率 $W_e/\%$		最终驱 油效率 $\eta/\%$	特征参数 D, ϕ_p		孔 喉 比			
											I	II		I	II				
	对比层	>100	0.076 1	0.262 4	11.651 9	0.23	0.755 6	6.019	104.64	0.561 6	58.12	30.65	64.78	0.25	0.171 0	1.60	2.56	0.2~3.5	0.48
	中低渗透层	100~50	0.112 7	1.248 5	4.390 0	0.25	0.794 4	11.648	83.39	0.369 2	47.35	31.00	55.56	0.18	0.256 6	1.65	2.40	0.3~1.5	1.36
I	一般低渗透层	50~10	0.236 2	0.613 4	2.471 4	0.28	0.828 4	25.975	47.02	0.260 4	41.50	34.95	55.43	0.10	0.466 3	1.81	2.20	0.5~3.5	3.23
II	特低渗透层	10~1.0	0.375 0	0.205 6	1.530 9	0.31	0.959 4	91.766	20.33	0.224 0	35.20	37.44	50.92		0.780 5	2.00	1.75	3.0~10.0	
III	超低渗透层	1.0~0.1	2.272 0	0.117 3	0.110 0	0.32	1.247 0	323.416	-10.99	0.174 6	23.50	49.81	39.53		1.685 0	3.25	1.10	10.0~16.0	14.26
IV	致密层	0.10~0.01	5.554 6	0.062 0			5.320 0		-17.50	0.150 0	20.68		36.52					16.0~28.0	14.81
V	非常致密层	0.01~0.001	>6.0	0.026 7					-17.04										
	超致密层	0.001~0.000 1		$<0.026 7$												>28.0	16.06		
VI	裂隙层	变化大或小于 10	低—中										16.4 (高或低)						
类型	名称	标准范围 K/($\times 10^{-3}$ μm^2)	储集体孔隙参数					储集体评价											
			孔隙直径/ μm	喉道半径/ μm	溶孔/%	孔隙配位/%	孔隙组合特征												
	对比层	>100	>42.0	>11.65	22.57	5~4	大孔、粗喉组合	中高渗层, 流动能力强, 主流半径大, 容易开采, 采收率高											
	中低渗透层	100~50	>38.0	11.65~4.00	28.19	4~3	中、大孔, 中、细喉组合	中低储集层, 流动能力强, 主流半径中等, 驱动压力低, 孔隙分选差, 采收率大于 50%											

续表 1-1

类型	名称	标准范围 $K/(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	铸体孔隙参数					储集层评价
			孔隙直径/ μm	喉道半径/ μm	溶孔/%	孔隙配位/%	孔隙组合特征	
I	一般低渗透层	50~10	40.0~20.0	4.0~2.0	70.00	3~2	中孔, 中细喉组合	低渗透集层, 流动能力差, 主流半径小, 孔隙分选差, 驱动压力低, 采收率大于50%
II	特低渗透层	10~1.0	40.0~20.0	2.0~1.0	39.43	3~2	中孔, 细喉、微喉组合	特低渗透集层, 流动能力差, 孔隙配位低, 喉道细, 孔隙分选差, 驱动压力大, 采收率50%左右
III	超低渗透层	1.0~0.1	40.0~20.0	2.0~1.0	59.36	2.66	小孔, 细微喉组合	超低渗透层, 流动能力差, 驱动压力大, 开采难度大, 采收率低
IV	致密层	0.10~0.01	20.0~4.0	1.0~0.025		<2.0	小孔, 微孔, 细微喉组合	很差的储集层, 孔隙几何大, 孔隙直径小, 孔隙配位低, 驱动压力很大, 开采难度大, 采收率低
V	非常致密层	0.01~0.001	4.0~0.05	1.0~0.025				非常差的储集层, 但可作为储气层, 油层的盖层
	超致密层	0.001~0.0001						
VI	裂隙-孔隙层	变化大或小于10						油层或气层

和国内的分界性也很强。

V类:非常致密层和超致密层

属此类的储集层有高尚堡高参一井沙二⁵₁组。它的显著特点是中值压力高,汞饱和度低,约30%左右,驱动压力大于28 MPa,是非常差的储集层,是油层的盖层,气的储层。

VI类:裂隙-孔隙层

此类层在高尚堡高参1井沙三⁵和彩南J₂x中有少量样品。其特点如下:

(1) 测试样品上有肉眼看不出的微裂缝,岩性非常致密。

(2) 具裂隙的岩心,水驱油效率低。长庆油田李检19井,85-2号样,渗透率 $4.48 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度16.3%,水驱油效率16.4%;同类孔隙型85-3号样,水驱油效率52.7%,二者比较,有裂隙的水驱油效率低,油水同产期长。

(3) 毛细管压力曲线上出现一个或多个台阶的曲线段,这些曲线段平坦部分平行于横坐标轴。排驱压力低于同类岩性的样品。

(4) 孔隙度低(4%~7%),渗透率有高也有低,但均较同类样品为高。渗透率范围变化大。

预计这样的储集层,在安塞、克拉玛依等油田的地层中可能存在,目前尚未单独划分出来,因而,我们把它作为一种类型,以引起油藏工程师们的注意。关于裂隙-孔隙型油层,其上下界限很难划分,它们中的不确定因素很多,是致密和特低渗透层中的特殊类型。

在胜利油田纯梁采油厂,为了保持纯化油田的整体统一,也为了方便与纯东区沙四上储层的对比分析,在纯西区仍采用卡迪姆储层分类法,即利用 K/ϕ 值与 r_{50} 孔喉半径关系,结合渗透率(K)、孔隙度(ϕ)、平均孔喉半径($r_{\text{平}}$)、孔喉半径中值(r_{50})、最大孔喉半径(r_{max})、排驱压力(p_d)、变异系数(V_R)、均质系数(C),将沙四上储层分为三类。纯西各地质单元孔隙度、渗透率的对比见表1-2。

表1-2 纯西各地质单元孔隙度、渗透率对比表

小层	2单元	62单元	69单元	75单元	92单元	纯西区平均
1 ¹	44.8/21.1	29.5/18.7	29.0/19.6	26.4/19.1	24.0/19.9	34.1/19.6
1 ²	68.7/22.0	28.9/19.8	40.3/20.2	35.9/19.8	60.0/21.8	51.4/21.0
1 ³	61.5/21.5	39.4/20.8	39.5/20.5	41.5/20.3	63.7/21.3	50.1/21.0
2 ³⁺⁴	27.8/20.5	24.8/21.5	19.5/20.6	29.0/23.1	18.6/20.8	24.1/20.9
3 ¹	39.5/20.5	32.4/19.9	21.2/19.5	11.3/18.6	44.4/22.1	33.2/20.3
3 ³	21.2/19.8	17.5/19.3	15.9/19.5	19.4/19.9	22.0/20.2	19.0/19.7
3 ⁴	22.3/20.0	17.8/19.3	28.7/21.1	17.1/19.3	33.0/21.2	24.6/20.4
3 ⁵	21.8/19.6	16.2/20.1	17.8/20.9	10.7/18.7	19.2/18.9	19.7/19.7
4 ¹	16.4/20.2	14.4/18.8	13.5/20.2		11.8/19.7	14.8/20.0
5 ¹	33.1/20.9	20.8/19.2	25.1/20.1	42.7/22.3	19.6/19.9	26.3/20.1
小计	35.7/20.9	24.2/19.7	25.1/20.2	26.0/20.1	31.6/20.6	29.8/20.4

说明:“/”左边数据为渗透率,单位 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;“/”右边数据为孔隙度,单位为%。

(1) 评价标准。

纯化油田沙四上储层评价标准见表1-3。

(2) 评价结果。

表 1-3 沙四上储层分类评价标准

分 类	I 类 (中渗储层)	II 类 (低渗储层)	III 类 (特低渗储层)
岩 性	长石粉砂岩、 长石粉细砂岩	灰(泥)质长石粉砂岩、 鲕状灰岩、砂屑白云岩	灰(泥)质长石粉砂岩、 泥灰岩、泥云岩
K/ϕ	>2.5	$0.6\sim 2.5$	<0.60
$K/(\times 10^{-3} \mu\text{m}^2)$	>50.0	$10.0\sim 50.0$	<10.00
$\phi/\%$	>20.0	$16.0\sim 20.0$	<16.00
$r_{50}/\mu\text{m}$	>2.0	$0.7\sim 2.0$	<0.70
$r/\mu\text{m}$	>2.2	$1.0\sim 2.2$	<1.00
$r_{\text{max}}/\mu\text{m}$	>5.0	$2.0\sim 5.0$	<2.00
$r_{\text{峰值}}/\mu\text{m}$	>6.3	$2.5\sim 6.3$	<2.50
标准偏差	>1.8	$0.72\sim 1.80$	<0.72
均质系数	>0.5	$0.36\sim 0.50$	<0.36

I类储层:主要分布在砂坝微相和滩砂微相的滩脊、滩侧砂体相带上,主要对应于平面分区图上的I类区。纵向上,1¹、1²、1³、2³⁺⁴四个主力砂体均有占研究区总面积10%~20%左右的分布,4¹砂体没有I类区,其他4个主力砂体仅占5%左右的面积。从分布位置来看,这类储层主要分布于纯2、纯92及纯75块东北部部分井区。这一类储层物性较好,油井产能较高。

II类储层:主要分布在碳酸盐岩滩坝微相的鲕粒滩、滨岸滩砂和滩砂微相上,主要对应于平面分区图上的II类区。除了3⁴、3⁵、4¹三个砂体外,其余7个主力砂体均以II类区分布为主,分布范围广。该类储层物性中等,油层具有一定的产能。

III类储层:主要分布在碳酸盐岩滩坝微相的灰泥坪、滨岸滩砂和滩砂微相上的滩洼,以及席状砂微相上,主要对应于平面分区图上的III类区,3⁴、3⁵、4¹三个砂体以这一类储层分布为主。该类储层物性较差,油层产能很低,多数非主力小层也属于此类。

综合来看,纯西区沙四上一至五砂层组的10个主力砂体中,从I+II类区占研究区面积的比例来看,1²、1³、2³⁺⁴、5¹等4个小层的I+II类区面积占研究区面积的70%以上,为最好;而1¹、3¹两个小层次之,为50%左右;其他四个小层在35%以下,为最差。见表1-4。

表 1-4 纯西区沙四上主力砂体不同储层类型面积对比表

油砂体号	I类区/%	II类区/%	III类区/%	非储集区/%	I+II类区/%	备 注
1 ¹	5	50	25	20	55	中 等
1 ²	20	60	15	5	80	较 好
1 ³	10	60	15	15	70	较 好
2 ³⁺⁴	10	75	15	<1	85	较 好
3 ¹	5	45	15	35	50	中 等
3 ³	<1	35	35	30	35	较 差
3 ⁴	<1	25	40	35	25	较 差
3 ⁵	<1	30	35	35	30	较 差
4 ¹	0	35	40	25	35	较 差
5 ¹	<5	75	20	<5	~ 80	较 好

第二节 薄互层低渗透油藏的形成条件

我国现已发现的低渗透油田遍及古生界、中生界和新生界。与中高渗透层相比,处于同一沉积环境(如湖盆)中,但低渗透层有特殊的形成条件。先天的物质条件是:近源沉积的颗粒混杂、分选差;远源沉积的颗粒细,泥质含量高;矿物成熟度低。后天的物质条件是:成岩压实作用强,伴有裂隙,出现双重孔隙带。孔隙个体小、喉道细、微孔多、含水高。

我国低渗透油层形成于山麓冲积扇-水下扇三角洲沉积体系和浊积扇沉积体系,有砾岩油层、砾状砂岩(或含砾砂岩)油层、砂岩(粗、中、细砂岩)和粉砂岩油层四种岩石类别。

一、近源沉积的油层分选差

近源沉积形成的低渗透油层,粒级分布范围宽,颗粒混杂,分选差。

1. 近源、山麓冲积扇-水下扇三角洲沉积体系

在这一沉积体系中,山麓冲积扇形成的砾岩油层(克拉玛依下乌尔禾组,表 1-5)、冲积扇-辫状河形成砾状砂岩(含砾砂岩)或砂岩油层(如彩南油田三工河、西山窑组,丘陵油田三间房、西山窑组等),在 $C-M$ 图中(图 1-1),依次处于 NO 、 OP 、 PQ 、 QR 段内, RS 段极不发育。

2. 近源密度流沉积体系

密度流(或碎屑流)沉积是冲积扇体系中的一个重要组成部分,在河流出口地段、事件性的沉积中,容易发生高能量密度流形成的油层。我国的克拉玛依砾岩油层、鄯善油田三间房组砾状砂岩油层、马岭油田岭 3 井油层内有高能量的密度流沉积。老君庙 M_3 油层是近物源的低密度洪流沉积, M_1 油层是高密度洪流沉积。尕斯库勒油田跃 42 井 E_3^1 油层段内的高能量密度流代表了这类油层的沉积特点,它们在 $C-M$ 图上是平行 $C=M$ 基线的一个宽的分布带,但距 $C=M$ 线较远处,它的外缘线离开正常 $C-M$ 线的 QR 线段,内缘线在 QR 段内,而不同于布尔的泥石流沉积。

二、近源深水重力流和远源沉积物形成的油层

近源深水重力流和远源沉积物形成的油层颗粒细、泥质含量高(表 1-6)。

1. 近源深水重力流沉积的油层

它们处于断陷盆地深渊陡坡一侧水域,容易发生密度流沉积(或浊流),规模大者称为浊积扇。深水重力流形成的油层,以细砂、粉砂岩为主,底部出现含砾砂岩。如马西深层板 II + III 油组、牛庄油田沙三中下段油层、文留油田沙三中盐间层、渤南油田沙三 5~9 油层均属深水密度流沉积。此类油层在 $C-M$ 图中,也是平行 $C=M$ 基线的一个宽带,但和前者不同(图 1-1 中虚线带内),群点分布于 QR 段内。

2. 远源加近源、近沉积中心沉积的油层

此类油层多属三角洲平原(分流平原),扇三角洲相中的分流河道、天然堤、决口扇、三角洲前缘席状砂。在事件性沉积中,有快速堆积的特点,可以有密度流或重力流沉积。粒度结构以细粒为主,并杂有残留水道粗粒沉积;矿物成熟度低,分选差,含泥量高。油层以细砂、粉砂岩为主,如朝阳沟油田、新民油田、新立油田、榆树林油田的扶余油层,安塞油田长 6¹ 油层等。

由此可以看出,与中高渗透油田(大庆油田)相比,低渗透油层的物质条件(粒度参数)具有分布范围广、不集中的特点(如中值、分选系数、偏态、峰态、跃移组分、跃移斜率、细截点等),而

表 1-5 形成低渗透油层的沉积环境和粒度特征

油田名称	油层组	沉积相带	主要岩心类型	中值/mm	粒度特征(ϕ 值)				滚动组分/%	跃移组分/%	悬移组分/%	跃移斜率	悬移斜率	<0.01 mm/%	粗截点CT(ϕ)	细截点F(ϕ)	样品数量
					均值	标准差 δ	偏度SK	峰态KG									
克拉玛依油田	下乌尔禾组	冲积扇(含高能密度流)	砾岩	10~3.5	-2.117	2.01	0.61	0.84				60°	25°~45°			-1.7	8
彩南油田	三工河组	冲积扇-辫状河	含砾砂岩、砾岩	0.18	2.46	1.46	0.42	1.78	5~30	35~70	4~25			6.4			92
	西山窑组	分流河道	细砂岩		3.45	1.65	0.55	2.13						10.63			73
丘陵油田	三间房组	河流三角洲	不等砾砂岩	0.2		2.16	0.48							11.08			292
	J ₂ S ₁₋₂	辫状河	粗、中、细砂岩、含砾砂岩	0.12		2.2	0.5							13.34			
	J ₂ S ₃₋₄	扇三角洲		0.23		2.15	0.48							10.26			
	西山窑组	水下扇三角洲	砾状砂岩	0.18~0.20	0.17	1.56~1.98	0.74~0.87							10.61~11.99			351

续表 1-5

油田名称	油层组	沉积相带	主要岩心类型	中值/mm	粒度特征(ϕ 值)				滚动组分/%	跃移组分/%	悬移组分/%	跃移斜率	悬移斜率	<0.01mm/%	粗截点CT(ϕ)	细截点F(ϕ)	样品数量
					均值	δ	偏差SK	峰态KG									
鄯善油田	三间房组	扇三角洲-分流河(含高能密度流)	粗、中、细砂	0.25~0.04	3.0~6.0	2.0~4.0	0.3~0.8	1.11~1.56							0~2.0	2.0~4.6	320
老君庙油田	M ₃ 油层	冲积扇辫状河(含低能量密度流)	含砾砂岩	0.17~0.09	2.53~3.46	2.51~2.66	0.76~0.92							9.05~14.58		2.55~3.73	289
老君庙油田	M ₂ 油层	含高能密度流	含砾砂岩	0.11~0.10	3.23~3.36	2.18~2.60	0.80~0.88							11.61~13.79		3.74~3.87	289
老君庙油田	M ₁ 油层	含高能密度流	含砾砂岩	0.10~0.09	3.27~3.49	2.48~1.81	0.70~1.03							7.25~14.06		3.19~3.65	
尕斯库勒油田	E ₃ 油层	扇三角洲-分流河、辫状河(跃42井有高能密度流)	砾岩、砾状砂岩	1.02~0.04		0.71~2.65	0.22~0.81	0.80~4.55									485

续表 1-5

油田名称	油层组	沉积相带	主要岩心类型	中值/mm	粒度特征(ϕ 值)				滚动组分/%	跃移组分/%	悬移组分/%	跃移斜率	悬移斜率	<0.01 mm/%	粗截点CT(ϕ)	细截点F(ϕ)	样品数量
					均值	标准差 δ	偏度SK	峰态KG									
马岭油田	延10~8油层	沉积前缘-河床(岭3井有高能量密度流)	含砾砂岩,粗、中、细砂岩	0.59~0.14	1.04~2.26	0.46~1.19	0.35~0.68	1.13~1.86	0~25	56~80	21~44	55°~67°		3.0~17.0		1.20~2.50	81
枣园油田	孔二段	水下扇近岸滩坝	细砂	0.11~0.09		1.60~1.67											678
高堡油田	沙三	辫状河、密度流												8.49		2.75~3.50	33
大港油田	西板I+II	深沉积扇前缘	粉-细粉砂岩	0.12~0.16	1.88			40~70				50°~80°			2.6~3.0		108
文留油田	沙中盐间层	扇三角洲积砂	粉砂岩	0.09~0.07	1.64					30~40							467
牛庄油田	沙一中	滑塌积岩	粉-细粉砂岩	0.17	1.6~2.0					40	60	50°~60°					78